

## COMODIDAD FERROVIARIA AL PASO DE PUENTES

Molina, J; Alvarez, R; Doblaré, M.<sup>+</sup> y Alarcón, E.

E.I.S.I. Industriales de Madrid.

+ E.T.S.I. Industriales de Zaragoza.

### INTRODUCCION

El trabajo presentado es continuación de los que, realizados sobre el mismo tema y por los mismos autores se han venido presentando en sucesivos Congresos (ver referencias 3 a 6). En él se exponen algunas de las conclusiones a las que el equipo de trabajo ha - llegado en el proceso de investigación que, auspiciado por la O.R.E. (Office de Recherches et D'Essais) - tiene como base la "Question - D.160: Flèche Admissible des Ponts".

Haciendo un breve resumen, el proceso se ha desarrollado en dos fases claramente diferenciadas. En la primera, el objetivo era la obtención de un conjunto de programas capaces de reproducir la respuesta de cada elemento del sistema (desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada coche, bogie, vía, vigas, etc). Se desarrollaron dos programas "BRIDGE" y "TRIGRA" que de una forma exhaustiva en aquél y relativamente simplificada en éste, cubrían los antedichos objetivos.

A continuación, y ya en una segunda fase, la disponibilidad de ambos programas permitió la realización de estudios paramétricos de la respuesta de cada elemento del sistema. Naturalmente, y dada la versatilidad de ambos programas, eran múltiples los criterios posibles en la elección de los parámetros de control.

Uno de estos criterios es la comodidad del pasajero, tanto al paso del puente como en tránsito normal. Así planteado, el problema se centra en la elección de un conjunto de parámetros cuya evaluación permita, por referencia a una escala predeterminada, establecer el grado de comodidad.

En lo que sigue se expone, en primer lugar, una - descripción del modelo empleado. A continuación, y - tras un rápido repaso de algunos de los más conocidos métodos para evaluar la confortabilidad, se examina el procedimiento del V.D.V., que algunos autores (referencias 16, 17, 20 y 21) consideran como muy indicado. Por último, se hace un resumen de las conclusiones y resultados obtenidos.

## MODELO DEL SISTEMA. METODO DE CALCULO

El especial comportamiento de los vehículos ferroviarios al atravesar un puente ha de ser atribuido a la interacción dinámica entre ambos sistemas, es decir, entre el vehículo y la estructura, camino de - guiado. El estudio del problema requiere, pues, considerar el puente y el vehículo como un sistema acoplado.

Hasta la fecha, los autores han desarrollado dos - programas de cálculo basados en los dos modelos de interacción vehículo-camino de guiado más extendidos: modelo de acoplamiento completo y modelo de acoplamiento parcial (ver [23]).

En el modelo de acoplamiento completo se aplica al camino de guiado la fuerza real de sustentación; mientras que, en el de acoplamiento parcial, sóloamente la componente estática debida al peso del vehículo; despreciando, por tanto, la componente dinámica de la - fuerza entre el elemento de sustentación y el camino de guiado. El modelo de acoplamiento parcial ha demonstrado ser una buena aproximación para vehículos de - baja relación masa no suspendida-masa suspendida y - buen nivel de comodidad.

En el primer programa ("BRIDGE") se recogió todo tipo de sofisticaciones, incluido el acoplamiento completo y un cuidado modelado de todas las partes del sistema; desde los pilares del puente hasta los elementos no lineales de los vehículos, pasando por el - comportamiento de vía y balasto. Este programa fue - descrito en artículos previos, [3] y [5], e implementado en un ordenador de tamaño grande.

Respecto al segundo programa, llamado TRIGRA, se - ha desarrollado para su uso en ordenador personal y aprovecha la experiencia adquirida para incorporar - grandes simplificaciones, tales como el acoplamiento parcial entre vehículos y puente. Este modelo de acoplamiento permite resolver la respuesta del puente - previamente y por separado para, con ayuda de ésta, -

integrar la correspondiente a cada uno de los vehículos como sistema aislado.

A pesar de las simplificaciones hechas en el segundo programa, los resultados con él obtenidos son comparables a los rendidos por el primer programa o los obtenidos mediante ensayos experimentales, como se verá en el apartado siguiente. Por otra parte, el programa ha demostrado ser una útil herramienta de trabajo, dadas su versatilidad y economía.

El modelo utilizado por el programa TRIGRA, que ahora pasamos a describir, está estrechamente ligado con el método de cálculo. Una descripción más extensa puede hallarse en [26] y [29].

Nuestro sistema consiste en el vehículo a estudiar, dentro del tren, aislado de cualquier otro vehículo y sometido a la excitación en desplazamiento sobre cada uno de sus ejes de ruedas. Esta excitación se calcula previamente sumando la flecha del puente bajo estos ejes a las irregularidades de la vía para todos los instantes. Para el cálculo de la flecha, el tren es sustituido por las cargas estáticas bajo cada eje, como corresponde al modelo de acoplamiento parcial, y estas cargas cruzan el puente a velocidad constante. En el caso de una viga simplemente apoyada con un número finito de funciones de formas senoidales asociadas, esta flecha tiene una expresión fácil de programar y que se puede hallar en [9].

En la figura 1 se muestran las historias de excitación debidas a la flecha del puente para los ejes de un tren de 3 vehículos.

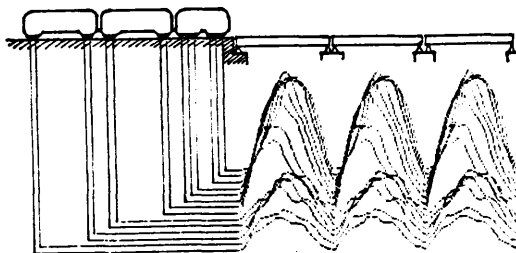


FIGURA 1. Historias de excitación para los ejes de los vehículos debidas a la flecha del puente.

Respecto al modelo para el vehículo, puede ser - complicado por estar trabajando con un sólo vehículo en cada integración y no con la totalidad del tren. Nosotros hemos utilizado el "método de los elementos componentes" en su formulación más sencilla [31], que sólo admite modelos de masa concentrada. De esta manera, se representa el sistema del vehículo por una - serie de sólidos con masa de traslación y de rotación y ligados por elementos, cuya ley fuerza-desplazamiento o fuerza-rotación es conocida.

Por tratarse de un modelo de masas concentradas, las ecuaciones del movimiento, resultan en la forma:

$$m_i \ddot{z}_i = Q_i \quad (i = 1, \dots, N)$$

donde hay N masas  $m_i$ , con coordenadas generalizadas  $z_i$ , y las fuerzas generalizadas  $Q_i$  actúan en cada - masa e incluyen, no sólo las fuerzas externas al sistema, sino también las debidas a los elementos (muelles, amortiguadores, etc.) que actúan dentro de él.

Conocidas las coordenadas del sistema en un instante y el valor de las excitaciones externas, es fácil despejar las aceleraciones en cada instante y esto da pie a la utilización de un método de integración paso a paso explícito.

El método de integración utilizado por el programa TRIGRA, es el llamado de diferencias centrales porque aprovecha la aproximación:

$$\ddot{z}(t) = \frac{z(t+\Delta t) - 2z(t) + z(t-\Delta t)}{\Delta t^2}$$

para la predicción de la posición  $z(t+\Delta t)$ , referida - al próximo instante de tiempo para cada grado de libertad.

En general, la estabilidad del método de integración se consigue mediante la elección de un incremento de tiempo lo suficientemente pequeño hallado por tanteo para sistemas no lineales.

#### EJEMPLO DEL PUENTE DE HÖRSTEL

El puente de Hörstel, situado en la R.F.A., fue - utilizado por la O.R.E. para la obtención de valores experimentales de aceleración en los vagones (ver referencia [28]). Por esta razón, se pueden usar estos valores como base de comparación.

El puente consta de un sólo tramo de 52 m. en cada sentido. Es una estructura metálica clásica en forma de celosía con las siguientes características:

Luz	L	52 m
Rigidez	EI	$2,56 \times 10^{11} \text{ N m}^2$
Masa repartida	m	4300 Kg/m
Núm. de modos	n	3
Rigidez global de la vía.	K	$3.10^8 \text{ N/3}$

Se utilizó un registro con la irregularidades de la vía en dirección vertical cada metro.

El tren de ensayos estaba compuesto por una locomotora BR103, un vagón IC y un vagón de registro. Se registraron las aceleraciones en la parte frontal y trasera de la locomotora y del primer vagón.

Los valores reflejados en la figura 2 para distintas velocidades de paso se refieren a  $\Delta z_I$  y  $\Delta z_{II}$ , que son los valores pico a pico de aceleración en ambos puntos del vehículo.

Los resultados que se obtuvieron con ambos programas son comparables a la realidad según se muestra en la figura. Las aceleraciones registradas en la locomotora mediante el programa TRIGRA se acercan especialmente a la realidad gracias al cuidado modelo, que se introdujo para este vehículo en el programa, y que se detalla en [26].

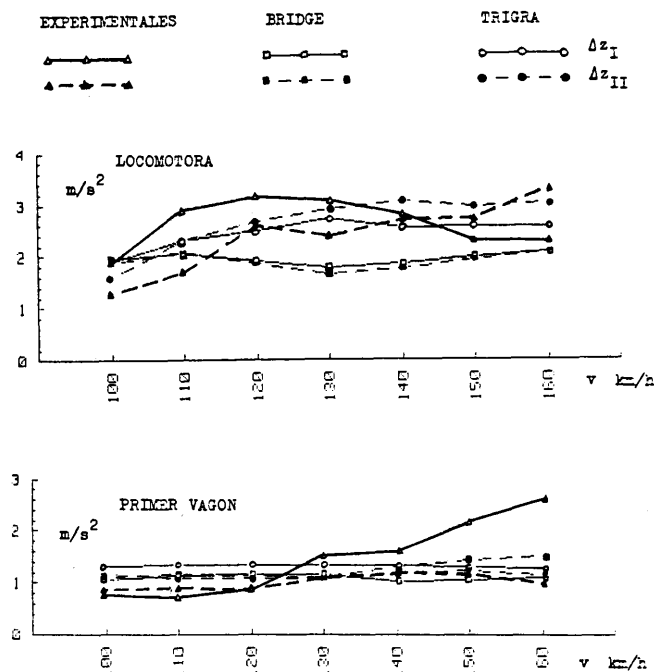
#### EL V.D.V. COMO MEDIDA DE LA COMODIDAD

La caracterización de las vibraciones desde el punto de vista de la comodidad es un tema que ha preocupado a las administraciones ferroviarias de numerosos países en los últimos años. Se han realizado ensayos con personas sometidas a vibraciones en una dirección fija y con forma senoidal pura para distintas amplitudes y frecuencias con este fin.

Así, por ejemplo, la S.N.C.F. estimó un "tiempo de fatiga" en función de la amplitud de la aceleración y de su frecuencia mediante una fórmula sencilla y consideró que la confortabilidad era buena cuando ese tiempo era superior a un número de horas.

# PUENTE DE HORSTEL

Valores pico a pico de aceleración:



$m/s^2$	$v \text{ km/h}$											
	100		110		120		130		140		150	
	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$	$\Delta z_I$	$\Delta z_{II}$
EXPERIM.	1.90	1.30	2.90	1.70	3.18	2.60	3.08	2.40	2.80	2.70	2.30	3.30
LOCOMOT.	1.96	1.86	2.06	2.08	1.92	1.86	1.78	1.66	1.86	1.76	1.98	1.94
BRIDGE	1.96	1.86	2.06	2.08	1.92	1.86	1.78	1.66	1.86	1.76	1.98	1.94
TRIGRA	1.92	1.59	2.32	2.32	2.50	2.69	2.72	2.92	2.54	3.07	2.56	2.96
EXPERIM.	.78	.88	.72	.92	.88	.88	1.52	1.12	1.60	1.20	2.20	1.20
1er VAG.												
BRIDGE	1.06	1.12	1.14	1.16	1.16	1.14	1.16	1.12	1.03	1.33	1.06	1.46
TRIGRA	1.32	1.17	1.35	1.08	1.35	1.08	1.35	1.10	1.35	1.19	1.33	1.23

Comparación de resultados.

FIGURA 2

Ha sido también muy usado el "índice de Sperling" (1977) como una medida atemporal de la incomfortabilidad y que se obtiene a partir de una función de la frecuencia multiplicada por la amplitud de aceleración elevada a 0,3. Esa función de la frecuencia facilitada por Sperling presenta sus valores máximos entre 4 y 10 Hz.

También se ha previsto la utilización de estos índices para excitaciones reales multifrecuencia mediante ciertas hipótesis siempre difíciles de contrastar.

La norma ISO 2631 (1978, ver referencias [20] y [21]) proporciona mediante gráficos valores del tiempo de fatiga en función de la amplitud y la frecuencia. En la figura 3 se reproduce una de estas gráficas referida a vibraciones verticales. Dentro de estas gráficas, para tiempo de fatiga constante, el valor de la amplitud en función de la frecuencia puede ser interpretado como una función inversa de la dañinidad de la vibración o como una función de ponderación para las distintas frecuencias de una señal no senoidal y que aparece en la figura 4. Esta función también presenta sus máximos entre 4 y 10 Hz. La ponderación de la señal multifrecuencia, como aconseja la norma ISO, conduce, no obstante, a un parámetro atemporal - de nuevo, siendo éste el obstáculo que se intenta salvar con el parámetro denominado V.D.V.

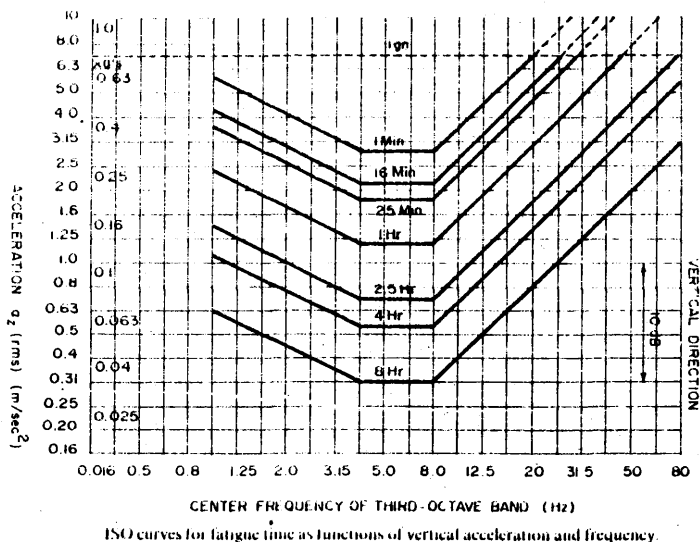


FIGURA 3

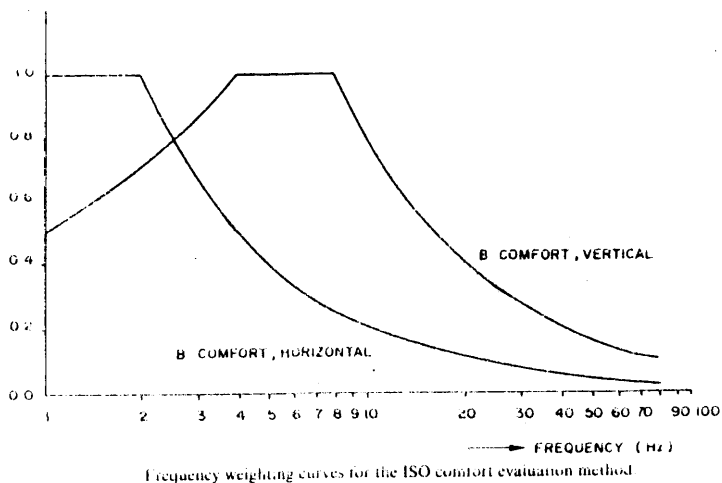
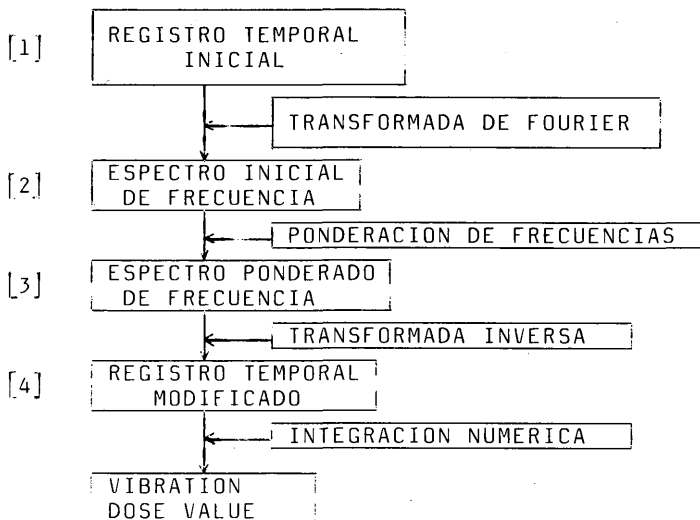


FIGURA 4

Lo que en adelante se designará como V.D.V. (Vibration Dose Value) corresponde al parámetro obtenido según la referencia [6]. Esto es, la integral de la cuarta potencia del registro temporal ponderado en frecuencia, según las funciones de la norma ISO.

Con el fin de automatizar su obtención, se programó un post-procesador (programa "OMEGA") que se limita a ejecutar secuencialmente las operaciones necesarias según el diagrama adjunto.





Los números entre corchetes se corresponden con los de la figura 5, que es una salida gráfica de cada paso.

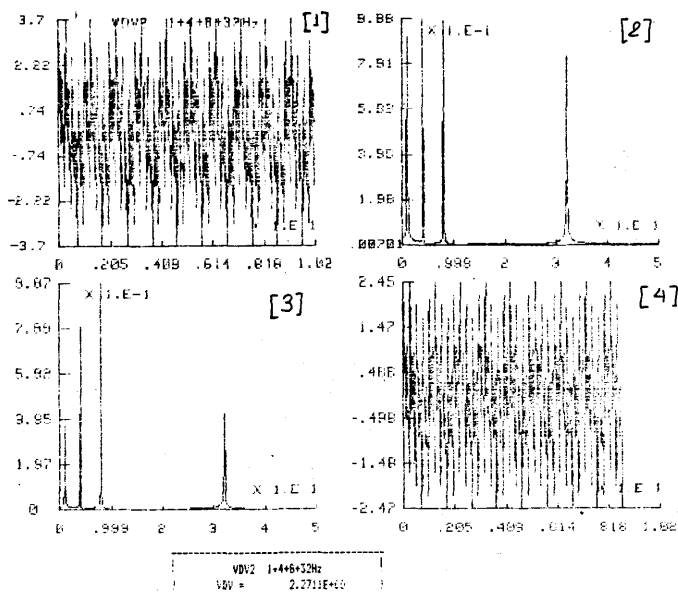


FIGURA 5

Los algoritmos utilizados son los más simples posibles: el F.F.T. para la Transformada de Fourier y la regla del trapecio en la integración.

## CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Se ha examinado la respuesta en tres de los puentes propuestos por el comité de expertos de la O.R.E. como genéricos.

Las características mecánicas de cada uno son las que se exponen en la tabla adjunta, aclarando de ante mano que se trata de puentes de un sólo vano y que el número de modos se refiere al número de deformadas - (senoidales) con que se aproxima la real.

QA	CC	QE	NAME OF THE BRIDGE
54	54	54	L (m) SPAN
L/400	L/294	L/2000	RIDIGITY
13100	8300	7100	m (kg/m) MASS
.368	.622	1.838	I (m <sup>4</sup> ) 2nd MOMENT
.078	.078	.078	↓ (I) LOG. DECR.
3	3	3	NUMBER OF MODES

El tipo de tren utilizado es clásico, compuesto - por una locomotora CC 6500 y un vagón CORAIL, con el sistema de cargas que se detalla en la figura 6.

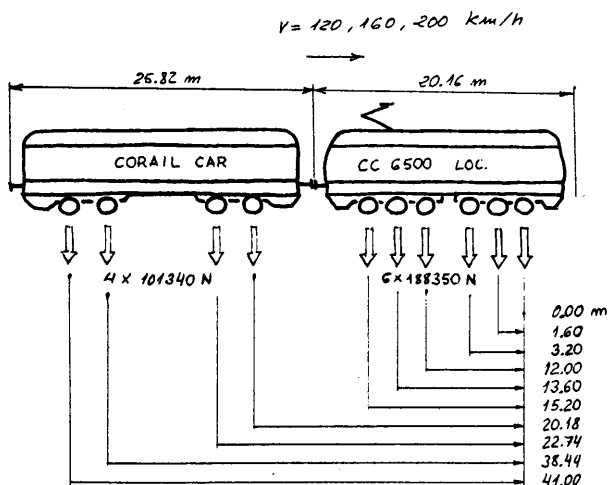


FIGURA 6

En cada caso se han efectuado pasadas correspondientes a las velocidades de 120, 160 y 200 Km/h.

La figura 7 muestra la aceleración en la parte delantera y trasera del coche, en el puente QA y para cada velocidad de paso.

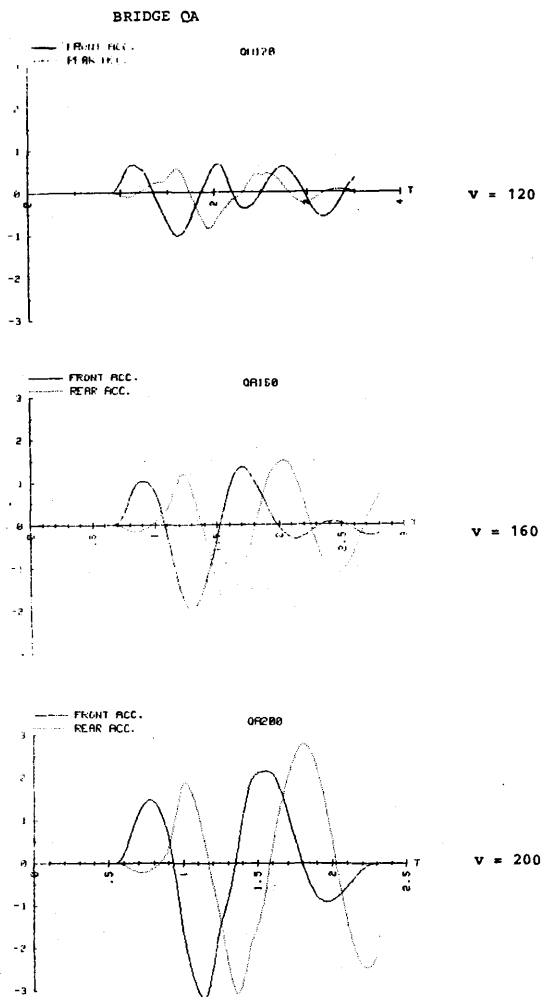


FIGURA 7

Los resultados obtenidos para el parámetro V.D.V. se reflejan en la tabla adjunta.

Estos valores son muy inferiores a aquellos que producen alguna sensación de incomodidad (valores que empiezan en  $2 \text{ ms}^{-1.75}$ ).

Se hace notar no obstante que ello ocurre a pesar de, que el registro temporal muestra aceleraciones im-

V.D.V.	RESULTS	FRONT	.298	.138	.051	120
			.529	.161	.086	160
			.841	.243	.114	200
		REAR	.227	.122	.051	120
			.520	.225	.105	160
			.969	.353	.151	200

V (km/h)

portantes, especialmente a velocidades elevadas.

Aparecen pues enfrentadas dos formas diferentes de entender la incomodidad causada por las vibraciones. El V.D.V. recoge la influencia de la duración de las vibraciones, pero no el efecto de transitorios que - tienden a desaparecer en el filtrado.

Es por ello que, al menos en lo que a esta aplicación se refiere, no parece aconsejable utilizar el - V.D.V. como parámetro único, a pesar de sus evidentes ventajas en cuanto a comodidad y sencillez de uso.

Por otra parte, la no inclusión de las irregularidades de la vía como factor agravante sobre la señal de partida, puede ser motivo de discrepancias con la realidad. Este aspecto, no considerado por la O.R.E., ha sido estudiado en la referencia [6].

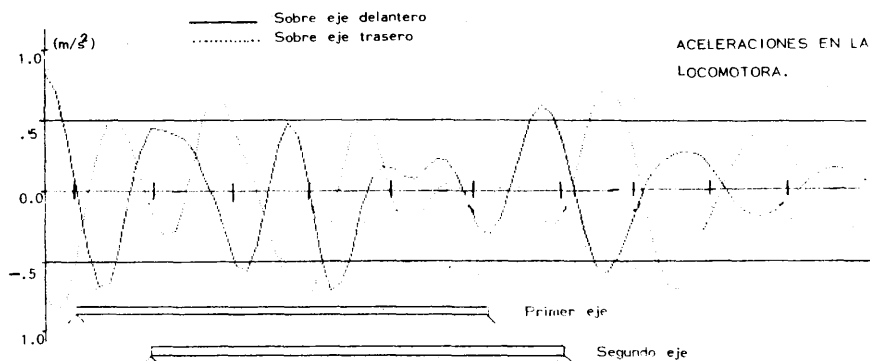
#### BIBLIOGRAFIA

1. Anónimo. "Revista de obras públicas". N. 2. (1853).
2. E. Alarcón. "Efectos Dinámicos en los Puentes". Tesis Doctoral. E.T.S.I. Caminos. (U.P.M.). (1970).
3. E. Alarcón, R. Alvarez, M. Doblaré y J. Molina. - "Interacción dinámica Vehículo-Vía-Estructura-Cimiento en Puentes de Ferrocarril". Anales de Ingeniería Mecánica. Año 1/Número 1/Diciembre 1983. - pp. 451-460.
4. E. Alarcón, R. Alvarez, M. Doblaré y J. Molina. - "Efectos dinámicos en Puentes de Ferrocarril". Memoria de Ponencias presentadas en la XII Asamblea Técnica Nacional de la Asociación Técnica Española del Pretensado.
5. R. Alvarez. "Interacción Dinámica Vehículo-Vía-Estructura en Puentes de Ferrocarril". Tesis Doctoral. E.T.S.I. Industriales. (U.P.M.). (1984).

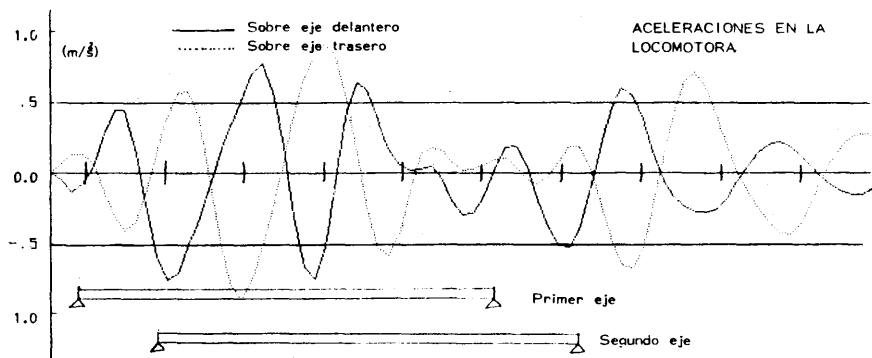
6. R. Alvarez, E. Alarcón y J. Molina. "Influencia de la Irregularidades de la Vía en la respuesta dinámica del sistema vehículo-vía-estructura en puentes de ferrocarril". Memorias del "I CONGRESO IBEROAMERICANO DE METODOS COMPUTACIONALES EN INGENIERIA". Madrid, Julio 1985.
7. J.H. Argyris, P.C. Dunne and T. Angelopoulos. - "Dynamic Response by Large Step Integration". - Earthq. Engng. Struct. Dyn. Vol. 1, pp. 283-291. (1973).
8. K.J. Bathe and E.L. Wilson. "Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods". - Earthq. Engng. Struct. Dyn. Vol. 1, pp. 283-291. (1973).
9. Biggs, Suer and Low. "The Vibration of Simple - Span Highway Bridges". Proc. A.S.C.E. Structural Division. (March 1957).
10. Bleich. "Theorie und Berechnung der Eisernen Brücken". Springer. (1924).
11. W.S. Chiu, R.G. Smith and D.W. Wormley. "Influence of Vehicle and Distributed Guideway Parameters on High Speed Vehicle-Guideway Dynamic Interactions". ASME. J. of Dynam. Syst. Meas. and Control. March. pp. 25-34. (1971).
12. C. Carbridge. "The effect of seating on rail vehicle ride". Paper presented at the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, 17-19. September 1985, Derby.
13. Department of Transport. "Proceeding of the - Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges". TRRL. Supplementary Report SR 275 Crowthorne. England. (1977).
14. Fleming and Romualdi. "Dynamic Response of Highway Bridges". Proc. ASCE. J. Structural Division. - (Oct. 1961).
15. L. Fryba. "Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads". Noordhoff Int. (1972).
16. M.J. Griffin. "Vibration Dose Values for whole-body vibration some examples". Paper presented to the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration held at Heriot-Watt University. Edinburgh, 21-22 September 1984.

17. M.J. Griffin, E.M. Whitham. "Time dependency of whole-body vibration discomfort". Journal of The Acoustical Society of America 68, 1522, 1523. - (1980).
18. J.B. Hunley. "Impact in Steel Railway Bridges of Simple Span". American Railway engineering Association. (1935).
19. C.E. Inglis. "A Mathematical Teatrise on Vibrations in Railway Bridges". Cambridge Univ. Press. (1934).
20. International Standards Organisation. "Guide to - the evaluation of human exposure to whole-body - vibration". I.S.O. Standard 2631 (1978).
21. International Standards Organization. "Fifthdraft revision of Standard 2631". (1985).
22. W. Kortum and R. Richter. "Simulation of Multi-body Vehicles Moving over Elastic Guideways". - Vehicle System Dynamics Vol. 6, pp. 21-35. (1977).
23. W. Kortum and D.N. Wormley. "Dynamic Interactions Between Travelling Vehicles and Guideway Systems". Vehicle System Dynamics Vol. 10. pp. 285-317. - (1981).
24. F. Machida and Matsuura. "Dynamic Response of Concrete Railway Bridges". IABSE Periodica. (2/1983).
25. Ministry of Transport. "Test on Railway bridges in Respect of Impact Effect". Advisory Committee for the revision of the board of trade requiere-ments 1914 in regard to the opening of railways. H.M. Stationery Office. London (1921).
26. J. Molina. "Estudio Dinámico de Puentes de Ferrocarril". Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.I. Industriales de Madrid. Julio 1985.
27. O.R.E.-U.I.C. "Fleche admissible des ponts". Question D-160. Rapport N. 1 (1983).
28. O.R.E.-U.I.C. "Fleche admissible des ponts". Question D-160. Rapport N. 2, Enero: "Analyse des Programmes de Calcul Existents". (1984).
29. O.R.E.-U.I.C. "Fleche admissible des ponts". Question D-160. Rapport N. 5". "Selection des programmes de calcul les plus appropriés". Abril, 1986.

30. G.P. Tilly, D.W. Cullington y R. Eyre. "Dynamic behavior of footbridges". IABSE Periodica, Vol. 2 (1984).
31. S. Levy y J.P.D. Wilkinson. "The Component Element Method in Dynamics". McGraw-Hill. (1976).



longitud de lanzamiento: 75 m.



longitud de lanzamiento: 5 m.

Respuestas obtenidas con el programa "TRIGRA" variando la distancia de lanzamiento.